

УДК 621.919.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.142924

Вплив матеріалу та технологічних факторів на поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин рельєфами та плівковими покриттями

Е. К. Посвятенко, Н. І. Посвятенко, Р. В. Будяк, Л. В. Швець,
Ю. Б. Паладійчук, П. А. Аксьом, І. П. Рибак, Б. М. Сабадаш,
В. М. Григоришен

Розглянуто сумісний вплив попереднього холодного пластичного деформування і екологічних мастильних речовин рослинного походження на поліпшення оброблюваності аустенітних сталей. Це розширює застосування таких сталей як конструкційного матеріалу у машинобудуванні. Досліджено також вплив мікро- та макрорельєфів оброблюваних деталей як технологічного та експлуатаційного факторів. Перший з них полягає у поділі припуску при обробці глибоких отворів, а другий – у поліпшенні експлуатаційних характеристик поверхні деталі. Вивчено вплив плівкових покриттів на підвищення довговічності підшипників кочення. Зокрема, встановлено, що такі покриття заліковують мікротріщини від шліфування обойм та тіл кочення і підвищують надійність цих відповідальних деталей підняттям рівня мікротвердості. Показано, що кривизну твірної глибоких отворів слід зменшувати шляхом зміни напрямків головних рухів на суміжних операціях. Установлено, що на спадковість у механічній обробці треба звертати особливу увагу.

Обґрунтовані шляхи поліпшення оброблюваності аустенітних сталей. Це використання попереднього холодного пластичного деформування для виконання частини роботи різання і переведення парамагнітного стану сталей у магнітний. Також, це застосування при різанні екологічно чистих мастил рослинного походження. Установлено подвійне призначення рельєфів поверхні деталі – технологічне та експлуатаційне. Перше з них виконується спеціальним протяжним інструментом і ефективно при обробці глибоких отворів. Друге призначення полягає у створенні лабіринтів для мастила і поділу оболонок на окремі елементи. Вивчено механізм дії вакуумних плівкових покриттів на надійність підшипників кочення, що полягає у залікуванні мікротріщин від попередньої абразивної обробки і підвищенні твердості поверхні. Показано, що зменшення висоти кривизни глибокого отвору досягається зміною головного руху суміжних операцій.

Результати дослідження є основою для створення технологій відповідальних деталей машин у виробництві

Ключові слова: експлуатаційні властивості, підшипники кочення, аустенітні сталі, регулярні рельєфи, глибокі отвори

1. Вступ

Надійність – це властивість об'єкту (машини, агрегату, механізму та деталі) зберігати у часі в установлених межах значення всіх параметрів, які характери-

зують здатність виконувати потрібні функції в заданих режимах та умовах застосування, зберігання та транспортування [1–3]. Надійність є комплексною експлуатаційною властивістю і включає безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та зберігаємість.

Як відомо з публікацій, що стосуються інженерії поверхні деталей машин, експлуатаційні властивості на 80 % визначаються властивостями поверхні цих деталей [2]. Ці властивості, у свою чергу, залежать від геометричних параметрів, фізико-механічних та фізичних характеристик поверхневого шару матеріалу. Геометричні параметри характеризуються макрогеометрією, хвилястістю, шорсткістю і напрямком слідів обробки деталі (спадковістю). Тому актуальним є розгляд переважно хвилястості та спадковості, оскільки інші геометричні параметри є добре вивченими.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У джерелі [1] наводяться загальні визначення надійності техніки. Проте не вказано, як надійність техніки забезпечується експлуатаційними властивостями матеріалів, зокрема, геометричними та фізико-механічними характеристиками поверхонь. У літературному джерелі [2] відзначається, що для поліпшення оброблюваності сталей різанням слід застосувати холодну пластичну деформацію. Проте автори не наводять інформацію щодо механізму дії такої деформації на метал, зокрема, нічого не сказано про структурні перетворення останнього. Роль рельєфів поверхні деталей відзначено лиш фрагментарно. У публікації [3] наводиться загальна інформація про структуру металевих матеріалів, однак не конкретизована ця характеристика щодо аустенітних сталей. Таким чином, немає можливості визначити шляхи підвищення оброблюваності таких сталей різанням. У фундаментальній праці [4] з механіки процесів різання відсутній опис зв'язку між явищами у зоні стружкоутворення та у контактній зоні на передній поверхні інструменту. Відповідно, з роботи неможливо визначити критерії оброблюваності. З роботи [5] також не витікає, що найбільш характерними показниками оброблюваності сталей є усадка стружки та контактні характеристики при низьких та середніх швидкостях різання. Публікація [6] присвячена макроструктурі та її фрагментам у складних матеріалах, проте не розглядається її вплив на експлуатаційні, зокрема, фізико-механічні властивості поверхонь. Роботу [7] присвячено цим важливим властивостям поверхонь деталей, зокрема, твердості, модулю пружності тощо. Наводиться методика їх досліджень, але відсутня інформація щодо впливу фізико-механічних властивостей на надійність деталей машин. У публікації [8] дана загальна характеристика інноваційних технологій композиційного зміцнення поверхні. Проте, не конкретизовано застосування цих технологій для поверхонь з рельєфами, підшипників кочення, глибоких отворів трубчастих деталей. У роботі [9], яка також є класичною, описано метод PVD, тобто отримання вакуумних покриттів. Однак автори не наводять конкретної інформації щодо застосування методу для плівкових вакуумних покриттів, що підвищують надійність масових деталей, зокрема, підшипників кочення. У публікації [10] відзначається, що такі покриття повинні створюватися на основі титану, алюмінію та азоту, тобто нітридів. Однак це слід

вважати занадто вузьким для методу. Робота [11] присвячена мікротопографії поверхонь, але нічого в ній не сказано про інші характеристики цих поверхонь. У публікації [12], яку присвячено технології порожнистих циліндрів, відсутні дані щодо методів боротьби з кривизною твірної та хвилястості останніх.

Отже, із аналізу літератури витікає, що фізико-механічні та фізичні властивості поверхневого шару (мікротвердість, мікроструктура та текстура, дислокації, взаємодія з мастилами, залишкові напруження, регулярний макро- та мікрорельєфи, феро- та парамагнетизм та ін.) досліджені недостатньо. Таку увагу з цієї ж причини слід приділяти і класу парамагнітних аустенітних сталей, як конструкційного матеріалу та матеріалу захисних покриттів. Ці сталі, відзначаючись рядом позитивних властивостей (зносо-, корозійно- та жаростійкість), мають вкрай низьку оброблюваність різанням. Із аналізу літератури витікає, що мало вивченими є також технологічні та експлуатаційні регулярні мікро- та макрорельєфи. Вплив окремих маловивчених технологічних факторів та матеріалу деталей на експлуатаційні властивості останніх слід було б простежити на прикладі таких масових виробів, як підшипники кочення та гільзи гідроциліндрів. Ці гільзи мають, так звані, глибокі отвори, характерні і для масового класу інших деталей (шахтні гідростійки, занурювані насоси і електродвигуни, камери згоряння некерованих твердопаливних ракетних снарядів, різноманітні амортизатори тощо). Потребує вивчення і технологічне застосування сучасних плівкових покриттів товщиною 1–5 мкм і менше.

Із сказаного витікає необхідність комплексного дослідження впливу матеріалу та технологічних факторів на поліпшення експлуатаційних властивостей деталей машин.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розробка способів поліпшення оброблюваності аустенітних сталей та підвищення експлуатаційних властивостей поверхні деталей машин шляхом створення регулярних рельєфів поверхні та використання захисних плівкових покриттів.

Для досягнення поставленої мети виконувались наступні завдання:

- дослідити вплив попереднього холодного пластичного деформування та визначити оптимальну марку екологічно чистої мастильної рідини рослинного походження, що у результаті сумісної дії поліпшило б оброблюваність аустенітних сталей як конструкційного матеріалу;

- розробити методи отримання регулярних мікро- та макрорельєфів поверхні деталей машин та визначити області технологічного та експлуатаційного призначення рельєфів;

- дослідити роль та механізм дії захисних плівкових покриттів кілець та тіл кочення підшипників кочення з позицій підвищення надійності останніх;

- визначити технологічні методи зниження хвилястості поверхні глибоких отворів порожнистих трубчастих деталей на прикладі гільз гідроциліндрів.

4. Результати дослідження впливу матеріалу та технологій на експлуатаційні властивості деталей

4. 1. Дослідження впливу матеріалу

Сталі аустенітного класу (жаро-, корозійно- та зносостійкі) мають виключно низьку оброблюваність різанням. Це обмежує застосування таких сталей у точних деталях машин. Більшість виробів із аустенітних сталей використовуються у техніці без фінішної механічної обробки. З метою розширення номенклатури деталей проведено комплексне дослідження, кінцевим результатом якого було поліпшення оброблюваності аустенітних сталей різанням.

Класиками науки про механіку різання металів [4, 5] показано, що коефіцієнт усадки стружки ξ та довжина повного контакту стружки з передньою поверхнею інструменту s можуть надійно свідчити про оброблюваність того чи іншого металу. Зменшення цих показників однозначно означатиме поліпшення оброблюваності.

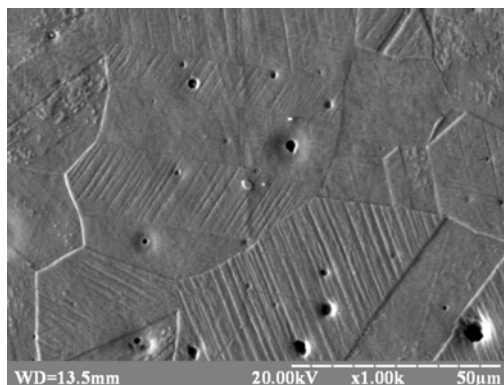
Виходячи з цих передумов та враховуючи результати власних досліджень [2], встановлено, що у зоні низьких та середніх швидкостей різання, характерних для обробки складним інструментом із швидкорізальної сталі (протягування, нарізання різьби, довбання тощо), факторами сильного впливу на оброблюваність аустенітних сталей є попередня обробка останніх холодним пластичним деформуванням та введення у зону різання рослинних мастильно-охолоджувальних рідин. Дещо слабше діє на процес швидкість різання, а інші фактори, у тому числі і передній кут, майже не впливають на оброблюваність у діапазоні досліджуваних факторів.

Роль попереднього холодного пластичного деформування полягає у тому, що при проведенні процесу виконується частина роботи, яку мала б виконати обробка різанням недеформованої аустенітної сталі. Крім того, частина аустеніту під дією деформації перетворюється у мартенсит. Тобто сталь отримує певні феромагнітні властивості, що також поліпшує її оброблюваність. Використання середовища рослинного походження поліпшує контактні процеси на передній поверхні інструменту. Отже, в результаті отримуємо подвійний позитивний ефект: з боку зони стружкоутворення через попереднє об'ємне холодне пластичне деформування, а з боку контактної зони – через ефективне екологічно чисте рослинне середовище.

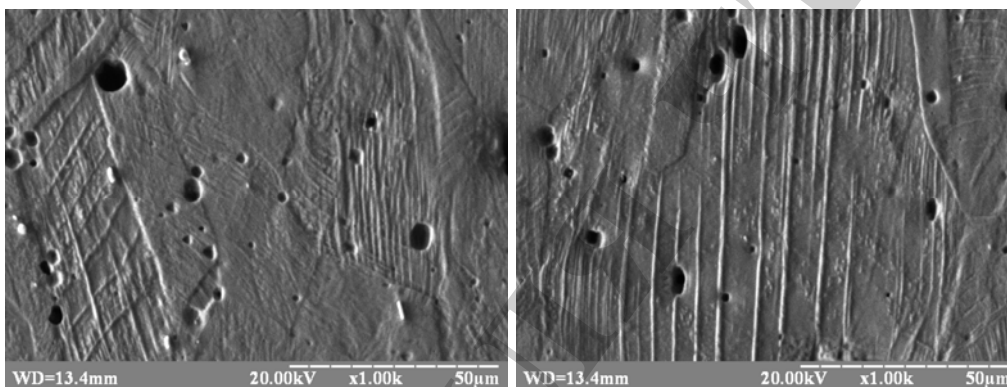
У процесі досліджень застосовувався запропонований новий ефективний, але простий метод поперечного стиску оброблюваного матеріалу, що забезпечувало необхідну кількість цього матеріалу для експериментів. Величина попередньої холодної деформації регулювалась у широких діапазонах. Для цього було достатньо гідравлічного пресу зусиллям 20 МПа.

Проведено серію експериментів з метою виявлення впливу об'ємного ХПД на густину дислокацій у аустенітних сталях. Металографічні шліфи зі зміцнених деформацією сталей та цих сталей у незміцненому стані виготовлялись на установці Beta Grinder-Polisher, фірми Buehler. Полірування шліфів проводилось алмазними пастами із синтетичних алмазів АМ зернистістю 60/40 і АСМ зернистістю 1/0. Потім за допомогою вакуумного травлення при температурі 920 – 950 °С на поверхні шліфів отримували рельєф з місцем виходів дислока-

цій на поверхню. Цей метод дозволяє вивчати дислокаційну структуру аустенітних сталей. Застосовувалась електронна мікроскопія ($\times 10000$) за допомогою мікроскопа РЕМ-106И.



a



б

в

Рис. 1. Розподіл дислокацій (крупні темні ямки – вихід дислокацій на площину мікрошліфа) зразка із аустенітної сталі 08X18N10: *a* – у початковому стані; *б, в* – після об'ємного ХПД

На рис. 1, подано розподіл дислокацій по глибині зразків із сталі 08X18N10 (AISI 304) у початковому стані (рис. 1, *a*) та після обробки ХПД (рис. 1, *б, в*).

Експерименти показали (табл. 1), що найбільш схильною сприймати пластичну деформацію є аустенітна сталь 08X18N10, тобто сталь системи легування (Fe–Cr–Ni). Дещо знижує цю схильність система (Fe–Cr–Ni–Mn). Що стосується попередньо загартованої сталі 110Г13Л (система легування Fe–Mn), то дія холодної пластичної деформації незначна. Сказане підтверджується мікрофотографіями, на котрих чітко видно двійники ковзання, полоси і пакети ковзання. Інтенсивність останніх переконливо засвідчує не однакову схильність до сприйняття холодної пластичної деформації аустенітними сталями різних схем легування.

Обробка мікрошліфів за відомими методиками показала, що густина дислокацій ρ в результаті обробки зразків об'ємним ХПД збільшується приблизно у 4 рази.

Скупчення дислокацій служить основою для формування мікротріщин у матеріалі, що сприяє поліпшенню оброблюваності різанням аустенітних сталей.

Проведено серію експериментів по виявленню впливу мастильно-охолоджувальних рідин на процес вільного ортогонального різання досліджуваних сталей марок 12Х15Г9НД, 08Х18Н10 та 110Г13Л різцем із сталі Р6М5 з переднім кутом $\gamma=15^\circ$ та швидкістю 0,2 м/с з товщиною зрізу 0,03 мм. Для цього використовувались стенди на базі поперечно-стругального верстату моделі 7М37 та горизонтально-фрезерного верстата моделі 6М83Г та мастильно-охолоджувальні рідини – сульфозфрезол Р і три види олій (ріпака, льону та соняшнику). Для порівняння різання здійснювалось також без мастильно-охолоджувальних рідин. Попереднє холодне пластичне деформування виконувалась за методом поперечного об'ємного стиску.

Результати експериментів наведено у табл. 1.

Аналіз результатів експериментів показує, що всі види олій дають приблизно однакові результати щодо поліпшення оброблюваності аустенітних сталей. Тому у подальшому, керуючись вартістю олій, вибираємо найдешевшу – ріпакову.

Таблиця 1

Вплив попереднього холодного пластичного деформування та виду мастильно-охолоджувальної рідини на усадку стружки ξ та повну довжину контакту стружки з передньою поверхнею інструменту c

| Марка сталі | Холодне пластичне деформування, $\varepsilon=46\%$ | Мастильно-охолоджуюча рідина | | | | | | | | | |
|----------------------|--|------------------------------|----------|-----------------|----------|---------------|----------|------------|----------|-------------------|----------|
| | | Без мас-тила | | Сульфо-фрезол Р | | Ріпакова олія | | Олія льону | | Соняш-никова олія | |
| | | ξ | c , мм | ξ | c , мм | ξ | c , мм | ξ | c , мм | ξ | c , мм |
| 12Х15Г9НД (AISI 201) | Незміцнена $HV=3,70$ ГПа | 3,9 | 0,19 | 2,85 | 0,12 | 2,34 | 0,09 | 2,44 | 0,10 | 2,36 | 0,09 |
| | Зміцнена $HV=4,96$ ГПа | 3,2 | 0,14 | 2,68 | 0,11 | 2,15 | 0,08 | 2,17 | 0,08 | 2,28 | 0,08 |
| 08Х18Н10 (AISI 304) | Незміцнена $HV=2,32$ ГПа | 4,2 | 0,22 | 2,91 | 0,12 | 2,41 | 0,09 | 2,50 | 0,10 | 2,43 | 0,10 |
| | Зміцнена $HV=3,85$ ГПа | 3,6 | 0,17 | 2,76 | 0,11 | 2,25 | 0,08 | 2,26 | 0,08 | 2,36 | 0,09 |
| 110Г13Л (A128) | Незміцнена $HV=6,00$ ГПа | 5,1 | 0,29 | 3,75 | 0,18 | 3,31 | 0,15 | 3,35 | 0,15 | 3,36 | 0,15 |
| | Зміцнена $HV=3,85$ ГПа | 4,5 | 0,24 | 3,56 | 0,17 | 3,13 | 0,14 | 3,15 | 0,14 | 3,25 | 0,14 |

Порівняння цієї олії з найпоширенішим традиційним для процесів різання сульфозфрезолом Р дало наступні результати. Сумісна дія холодного пластичного деформування і середовища при різанні аустенітної сталі 12Х15Г9НД знижує коефіцієнт усадки стружки на 25 %, а повної довжини контакту – на 34 %. При обробці аустенітної сталі 08Х18Н10 ці показники відповідно такі: зниження ξ на 24 %, а c – на 34 %. Обробка зносостійкої аустенітної сталі 110Г13Л характеризується наступними результатами: зменшення коефіцієнта усадки стружки на 16 %, а повної довжини контакту – на 22 %.

Отже, попереднє холодне пластичне деформування у поєднанні з використанням мастильно-охолоджувальних рідин на рослинній основі є потужним засобом поліпшення оброблюваності деталей із аустенітних сталей. Це видно із рис. 2, де представлені фрагменти процесу стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД, зміцненою поперечним стиском у середовищі ріпакової олії (а) та сульфозфрезолу Р (б). Поліпшення оброблюваності цієї сталі характеризується також меншим радіусом завитка останньої на 28 %.

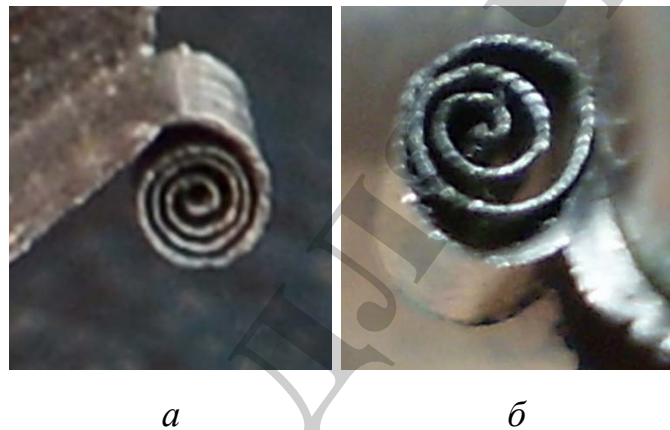


Рис. 2. Фрагменти стружкоутворення при вільному ортогональному різанні сталі 12Х15Г9НД (AISI 201), зміцненої по схемі поперечного стиску з деформацією 46 %: а – у середовищі ріпакової олії; б – сульфозфрезолу Р

Таким чином, є підстави рекомендувати прецизійну термообробку як ключову операцію для повернення початкових властивостей деталей із аустенітних сталей (високої жаро-, корозійно- та зносостійкості).

4. 2. Дослідження впливу рельєфів поверхні деталей на експлуатаційні властивості

Створення на оброблюваній поверхні деталей мікро- та макрорельєфів розглядається як фрагментація цієї поверхні. У фізичній макромеханіці це складова синергетики (самоорганізаційного процесу). У залежності від конфігурації і типу фрагментів пропонуються положення щодо фізичних властивостей матеріалу при розтягуванні і стисненні. Прогнозуються розміри фрагментів, час до руйнування і величину критичної деформації [6].

Фрагменти поверхні регулярного мікро- та макрорельєфу (дискретність, глибина та профіль канавок) наперед визначаються. Використовуються два методи отримання канавок: різанням лезовим або абразивним інструментом і заглиблення лінійних інденторів. При цьому передбачено дві функції канавок: технологічна та експлуатаційна.

Технологічна функція регулярних мікро- та макрорельєфів полягає у попередньому примусовому поділі зрізуваного припуску канавками у процесах механічної обробки глибоких отворів деталей із пластичних матеріалів (сталі, латуні, алюмінієвих сплавів). Тоді утворюється міцна зливна стійка стружка.

В основу способу отримання кільцевих канавок для поділу стружки покладено наступне контактне явище. Після зупинки і наступного відновлення цього процесу на поверхні утворюється кільцеподібна канавка. Вона відтворює профіль деформуючого елемента в області верхньої частини. Якщо між деформуючим кільцем та зубом комбінованої протяжки розмістити ділильний елемент оптимального профілю, це дасть можливість отримати глибшу канавку. При статичному довантаженні ділильного елемента глибина канавки може досягти 0,2 мм.

На рис. 3 подано схему комбінованого протягування з розміщенням на протяжці кільцевого індентору.

Для отримання технологічних канавок підвищеної глибини слід інтенсифікувати процеси ультразвуком або застосувати комбіновані протяжки з елементами, що обертаються.

Ще одне призначення регулярних рельєфів – експлуатаційне. У цьому випадку рельєфи використовуються для виготовлення деталей пар тертя ковзання. Такі пари працюють під тиском робочого тіла: гідро- та пневмоциліндри, амортизатори, стійки кріплення шахт, поршневі та плунжерні пари двигунів внутрішнього згоряння, компресорів, насосів тощо. У цьому випадку канавки служать об'ємами для мастил, лабіринтами для ущільнення пар тертя та ін. Якщо застосувати холодне пластичне деформування, то рельєфи на поверхні деталей можна отримати поєднанням деформуючого протягування з кульковим розкатуванням. У цьому випадку інструмент оснащено рельєфним деформуючим елементом, що створює поздовжні канавки, а кулькова розкатка – канавки у напрямку подачі. Можливим також є одночасне з рельєфоутворенням заповнення лабіринтів твердим мастилом за один прохід інструменту. Регулярні мікрорельєфи можна також формувати деформуючим протягуванням.

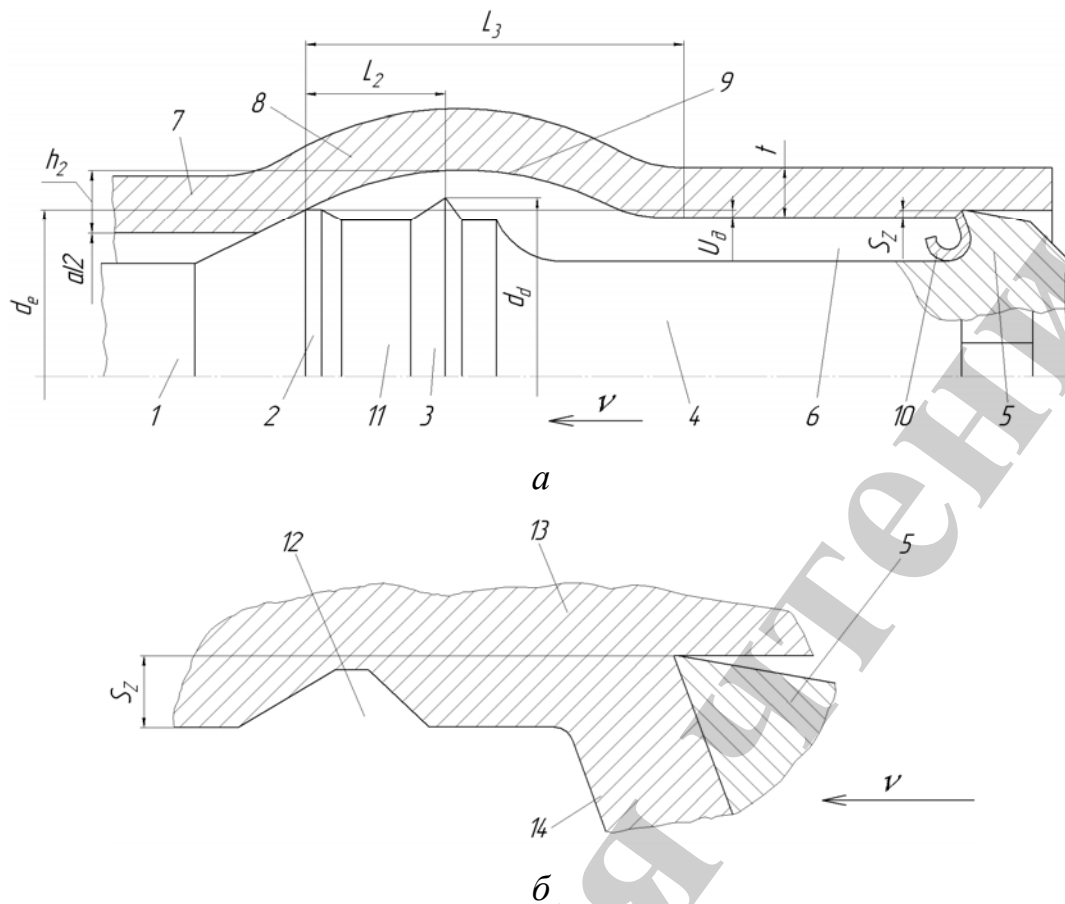


Рис. 3. Схема комбінованого протягування: а – інструмент з кільцевим індентором; б – поділ припуску канавкою; 1, 11 – дистанційні втулки; 2 – деформуюче кільце; 3 – ділильний елемент; 4 – різальна частина із зубом 5; 6 – видовжена стружкова канавка; 7 – заготовка порожнистої трубчастої деталі; 8 – рухома дільниця пружно-пластичної деформації; 9 – поверхня хвилі позаконтактної деформації з довжиною L_3 , відстанню до максимуму L_2 і висотою h_2 ; 10 – валик стружки; 12 – кільцева стружкоподільна канавка; 13 – деталь; 14 – стружка. Складові процесу та інструменту: v – швидкість і напрям руху інструменту; S_z – припуск; t – товщина стінки заготовки; $a/2$ – натяг; U_d – пружне відновлення заготовки; d_e і d_d – діаметри відповідно деформуючого кільця і ділильного елемента

Рельєфи експлуатаційного призначення використовуються для виготовлення осколочних оболонок бойових частин активних і реактивних снарядів, мін, авіаційних бомб, гранат [2, 7]. Для отримання поздовжніх і гвинтових канавок глибиною до 3 мм, за якими відбувається поділ деталі на осколки при ініціюванні вибухової речовини, запропоновано використовувати редукування. Цей метод полягає у проштовхуванні трубної заготовки разом з фасонною оправкою крізь твердосплавну матрицю. Оправка має поздовжні виступи трикутної форми. Таким способом були отримані канавки на внутрішній частині корпусу авіаційної бомби (рис. 4).



Рис. 4. Фрагмент внутрішньої частини корпусу авіаційної бомби з поздовжніми канавками, отриманими редукуванням

Гвинтові канавки для попереднього формування осколків ручних гранат рекомендується отримувати за запропонованим методом протяжним інструментом, який оснащено самообертальними елементами. При поздовжньому русі цього інструменту елементи формують ліву і праву гвинтові канавки, що перетинаються.

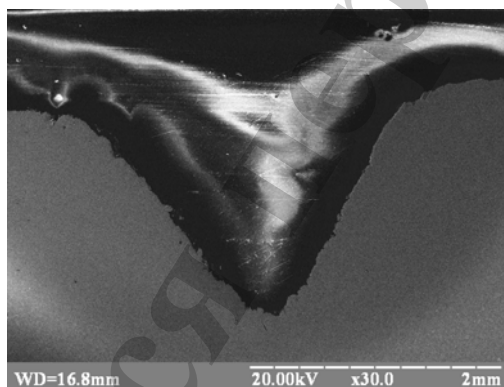


Рис. 5. Мікрофотографія канавки, отриманої заглибленням трикутного лінійного індентору (сталь Р6М5, HRC 66) у зразок зі сталі 30ХГСА, глибина канавки 2 мм, кут при вершині 60°

Експерименти щодо дослідження методу отримання канавок (рис. 5) глибиною 0,005–5 мм методом холодного пластичного деформування було проведено на гідрофікованих пресах з зусиллям 0,2 МН і 63 МН (моделі Д-2238). Використовувався також горизонтально-протяжний верстат моделі 7Б56. Інструментом служили трикутні лінійні індентори із швидкорізальної сталі Р6М5 з кутами при вершині 30° – 90° і радіусом округлення вершини 0,005 мм.

4. 3. Дослідження механізму дії захисних плівкових покриттів на експлуатаційні властивості підшипників

У вузлах тертя машин широко застосовуються підшипники кочення. Часто ці вузли працюють у хімічно активних середовищах (газах або рідинах). Підшипники кочення виготовляють, як правило, із хромистих сталей. При цьому

використовують сталі ШХ15; ШХ15Ш; ШХ15В і 18ХГТ. Твердість цих деталей знаходиться в межах HRC61...65. Твердість кульок повинна бути рівною 63...67 HRC. Неоднорідність по твердості в межах одного кільця не повинна перевищувати 3 HRC. Якщо підшипник кочення застосовують для роботи при підвищених температурах, то для забезпечення стабілізації розмірів деталі підшипник кочення відпускають при температурах понад 150 °С (на 50 °С вище робочих температур).

Хромисті сталі термодинамічно нестійкі, тобто такі, що викликають протікання трибохімічних реакцій, які є невід'ємною складовою тертя твердих тіл.

Сутність трибопроцесів полягає у тому, що ці процеси протікають в умовах імпульсної силової дії і супроводжуються розсіянням механічної енергії. Існує два основні канали незворотної дисипації механічної енергії у процесі тертя: трибохімічний і реологічний. Їх проявлення визначається рядом факторів: властивостями оточуючого середовища, параметрами зовнішнього навантаження та природою пари тертя. Реологія, тобто теорія в'язкопружності або узагальнення теорії пружності і гідродинаміки в'язкої рідини, є аналітичною основою при описанні різних видів деформації і текучості речовин. Частки розсіяної та запасеної енергії поверхневим активним шаром визначають кінетику накопичення пошкоджень і руйнування. Усе це стосується і підшипників кочення, як характерної моделі пари кочення.

Шорсткість поверхні нормальних підшипників кочення за параметром Ra повинна бути: не вищою, ніж 1,25 по поверхні отвору; не вищою, ніж 0,63 і 1,25 по зовнішній поверхні при діаметрі кільця до 80 мм і 80–250 мм відповідно.

Як бачимо, усі сталі, які використовуються для виготовлення кілець та тіл кочення, легують досить високою кількістю хрому (1–1,5 %). А такі хромисті сталі, крім високої зносостійкості, відзначаються ще й доброю оброблюваністю шліфуванням і сприйняттям модифікування методами інженерії поверхні.

Теоретично-розрахункова частина дослідження полягала у наступному. Для вирішення задачі розподілу навантаження між тілами кочення (кульками) у підшипниках кочення було уперше запропоновано варіаційно-експериментальний метод. При цьому були прийняті такі допущення: основа із кульок, на яких покоїлось зовнішнє кільце підшипника кочення, замінювалось суцільною основою з еквівалентною податливістю. Еквівалентність вважалась якісною. Коефіцієнт концентрації зусиль на кульках та тиску в еквівалентній схемі вважались рівними.

Вирішення рівняння рівноваги системи показало, що варіаційний метод визначення функції розподілу навантажень на тілах кочення є ефективним.

При практичному використанні методу досліджувались підшипники серії 208 з розмірами: діаметр отвору 40 мм; зовнішній діаметр 80 мм; ширина 18 мм. Навантаження Q передавалось через вал діаметром 40 мм на ручному гідравлічному пресі, а переміщення u_0 вимірювалось з точністю 0,01 мм. Результати вимірювання сили Q , що викликали переміщення u_0 наведені нижче у табл. 2.

Таблиця 2

Значення сили Q і переміщення u_0 підшипників кочення

| № експерименту | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Q , кг | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 |
| u_0 , мм | 0,68 | 0,8 | 0,93 | 1,03 | 1,12 | 1,24 | 1,35 | 1,44 | 1,57 | 1,67 |

Порівняння коефіцієнтів концентрації для досліджуваних підшипників серії 208 з 9-ма кульками кочення, отриманих теоретичним та варіаційно-експериментальним методами показало розбіжність менше 1 %, тобто практично повне співпадіння.

Ще одним заходом підвищення надійності підшипників кочення був технологічний [8]. Для того, щоб отримати якісну поверхню деталей, необхідно застосувати методи інженерії поверхні, серед яких одним з найбільш ефективних є іонне азотування. Це тому, що азотування є фінішною операцією [9, 10].

При іонному азотуванні, на відміну від процесів класичного азотування, заміна водню на аргонно-азотну суміш дозволяє позбутися водневого окрихчування і, як наслідок, погіршення механічних властивостей серцевини деталей. Висока якість поверхневого шару і основи у процесах іонного азотування досягається за рахунок їх використання при температурах, нижчих температур високого відпускання. Це виключає деформації деталі. Важливу роль тут також відіграє висока енергія потоку частинок, що конденсуються на поверхні. Завдяки цьому у мікрооб'ємах поверхневого шару створюються умови, що забезпечують утворення нітридів. Відбувається також зміцнення фериту та аустеніту сталі за рахунок розчинення азоту у останніх.

Таким чином, іонне азотування у випадку його застосування у технологіях отримання основних деталей підшипників (кілець та кульок) виконує подвійну роль. З одного боку, на цих деталях формується без зміни їх розмірів та шорсткості захисний шар. Це не дозволяє проникати із зовні шкідливим елементам, у першу чергу, кисню. Крім того, за рахунок утворення нітридів і зміцнення фериту чи аустеніту поверхневий шар відповідальних деталей підшипників отримує додаткове зміцнення.

Для реалізації процесу азотування використовується нестабільна (позитивна) ділянка FG вольт-амперної характеристики, так звана область сильнопоточного тліючого розряду [8] (рис. 6).

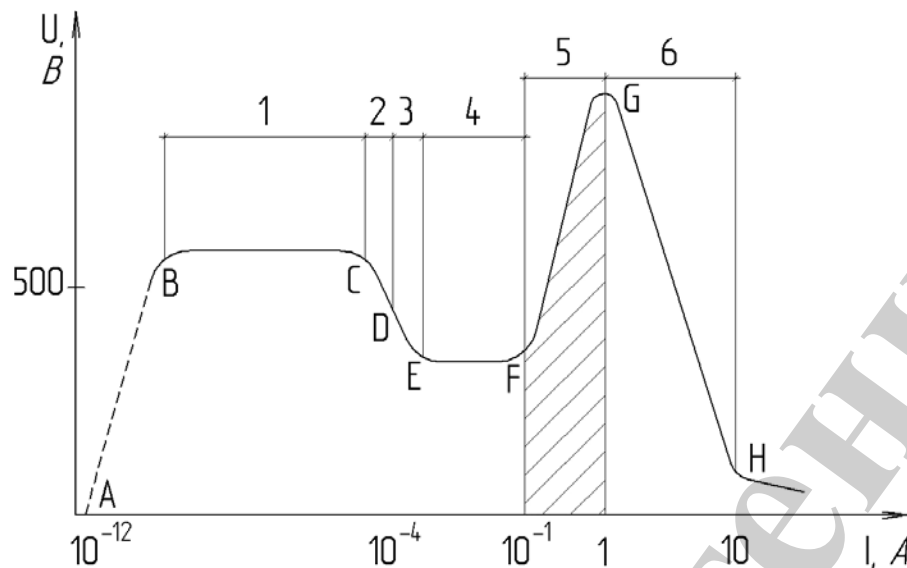


Рис. 6. Типова вольт-амперна характеристика: 1 (BC) – розряд Таунзенда; 2 (CD) – коронний розряд; 3 (DE) – субнормальний тліючий розряд; 4 (EF) – нормальний тліючий розряд; 5 (FG) – аномальний тліючий розряд; 6 (GH) – дуговий розряд

Процеси, що протікають на поверхні катоду при утворенні іонів газу, можна розкласифікувати наступним чином: емісія електронів; викидання атомів з поверхні (випаровування); дифузія іонів у поверхневий шар деталі; віддача кінетичної енергії поверхні (нагрівання) деталі. У кількох міліметрах від поверхні деталі іони, що були прискорені в області падіння катодного потенціалу, з великою кінетичною енергією потрапляють на поверхню деталі. При цьому до 90 % енергії іонів перетворюється у теплову енергію. Таким чином, плазма нагріває деталь до необхідної температури азотування. Значно менша частина кінетичної енергії іонів потрібна для викидання атомів з кристалічної решітки. Випаровуватись можуть метали та металеві сплави, а також неметалеві матеріали: вуглець, кисень, азот тощо. Формування азотованого шару відбувається наступним чином: укорінені у поверхневий шар матеріалу атоми азоту дифундують у подальшому границями зерен і, власне, через зерна. У залежності від тривалості обробки і параметрів процесу азотування виникає відповідний концентраційний профіль. При іонному азотуванні у імпульсному режимі дифузія азоту відбувається таким чином: якщо на поверхні шару концентрація азоту досягає величини, необхідної для утворення γ' - або ϵ -нітриду, тоді відбувається утворення саме цих нітридів. Останні утворюються з окремих зародків і формують щільний шар, так званий "шар з'єднань".

Товщина азотованого шару незалежно від вмісту азоту зростає у результаті проникнення азоту у відповідності з другим законом Фіка [2, 8].

Одночасно продовжується дифузія атомів азоту через шар сполук у глибину металу. При цьому швидкість дифузії через γ' -фазу приблизно у 25 разів менша ніж через ферит. Дифундуючий шар вуглецю при азотуванні залишається у шарі сполук, де цей шар поглинається утвореними нітридами. Границі зерен, у яких розміщені карбіди, розширюються у результаті поглинання азоту [2].

Азот у плазмі знаходиться у атомному хімічно активному стані. Перед поверхнею катоду відбувається утворення нітридів заліза, насичених азотом. Молекули FeN конденсуються на поверхні деталі і дисоціюють, утворюючи нітриди заліза більш низького порядку Fe_2N , Fe_3N і Fe_4N . При цьому азот, що виділяється, дифундує у деталь або, випаровуючись, повертається у плазму.

Швидкість іонного азотування є "ахіллесовою п'ятою" процесу, тому що складає усього 0,01–0,02 мм приросту товщини азотованого шару за годину. Це тому, що усі відомі схеми поліпшення азотування практично вичерпані. Сказане стосується складу газового середовища, тиску, температури, характеристик тліючого розряду, алгоритму підготовки до процесу і ведення власне процесу, а також конструктивних параметрів установки. Проте у випадку створення захисного азотованого шару на обоймах та тілах кочення (кульках) підшипників це не має суттєвого значення. Це тому, що товщина захисного шару може вимірюватись у мікрометрах або частках мікрометра.

Режими іонного азотування були наступними: температура 530–550 °C; тиск 87 Па; напруга 400 В; сила струму 12 А; середовище – суміш азоту (N_2 – 80 %) і аргону (Ar – 20 %). Для забезпечення робочої температури, меншої температури високого відпуску, була розроблена схема живлення, яка працює у імпульсному режимі з частотою 100 Гц. Для запобігання перетворення метастабільного тліючого розряду у небажаний стабільний дуговий розряд в установці для азотування було запропоновано використати швидкодійне реле. Це запобігає пошкодженню поверхні зміцнюваної деталі.

Слід відзначити, що при реалізації безводневого азотування підшипників кочення особливу увагу слід приділяти попередній підготовці поверхні. Перед операцією необхідно видалити усі залишки забруднюючих речовин. Для цього найкраще підходить миття у мийній машині з використанням ультразвуку. При цьому посадочні поверхні (зовнішню та внутрішню) підшипників кочення, шорсткість яких становить $R_a < 2,5$ і $R_z < 20$, не слід захищати, оскільки вони працюють в умовах фретинг-зношування. Азотування саме тому підвищує зносостійкість цих поверхонь.

4. 4. Дослідження впливу хвилястості поверхонь глибоких отворів на властивості деталей

Виконавчими органами гідросистеми машини служать силові та маніпуляційні гідроциліндри. Найбільш складною деталлю останніх з позиції виготовлення та ремонту є гільза, оскільки її отвір належить до класу глибоких. Поверхня отвору повинна відповідати жорстким вимогам за показниками точності: некруглість у межах H7–H9 і відхилення від прямолінійності твірної до 0,25 мм на 1000 мм довжини отвору, а також шорсткість обробленої поверхні R_a 0,05–0,15 мкм.

Вплив фізико-механічних та геометричних властивостей поверхні після комбінованого деформуюче-різального протягування на оброблюваність гільз полягає у наступному. Товщина холодного зміцнення і текстурованості поверхневого шару сягає 0,2 мм, а коефіцієнт тертя на задній поверхні зубця протяжки знижується попереднім холодним пластичним зміцненням з 0,5 – 0,7 до 0,2–

0,35. У поверхневому шарі виникають сприятливі тангенціальні залишкові напруження першого роду.

Для поверхні гільз гідроциліндрів фактор хвилястості має велике значення, оскільки в кінцевому результаті впливає на небажане витікання і перетікання робочої рідини із системи. У діючих процесах на хвилястість не звертають уваги (рис. 7).

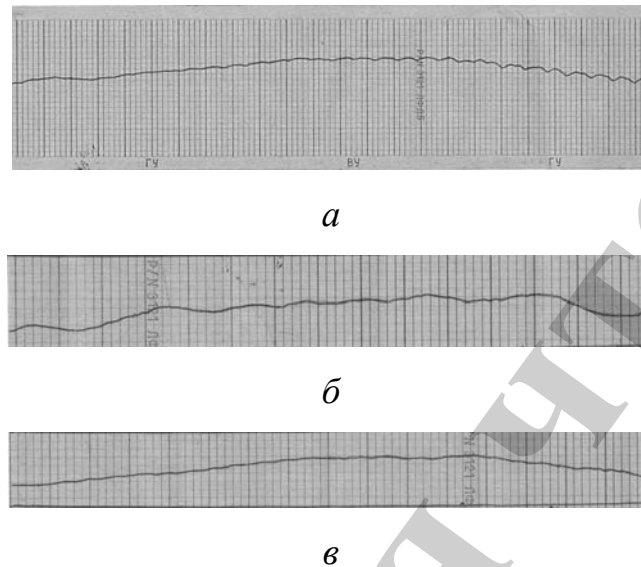


Рис. 7. Приклади хвилястості поверхні готових гільз гідроциліндрів, виготовлених за діючою заводською технологією ВУ1000, ГУ5: *а* – ТМЗ, м. Турбів; *б* – ТОВ «АгроМастерПлюс», м. Мелітополь (Україна); *в* – Трубна заготовка, Румунія

У всіх випадках хвилястість пояснюється інтерференцією максимумів шорсткості від кількох видів обробки, оскільки напрям головних рухів усіх цих операцій збігається. Експерименти на стенді на основі протяжного верстату моделі 7Б57 і горизонтально-розточувального верстату показали, що застосування комбінованої обробки ліквідує хвилястість обробленої поверхні шляхом зміни головних рухів протягування та розкатки на 90° .

5. Обговорення результатів дослідження поліпшення експлуатаційних властивостей деталей

Для підвищення оброблюваності аустенітних сталей як основного конструкційного матеріалу та матеріалу захисних покриттів рекомендується застосовувати попереднє об'ємне холодне пластичне деформування з використанням екологічно чистих мастил рослинного походження. Таке поєднання дозволяє отримати сумісний позитивний ефект при різанні з боку зони стружкоутворення і контактної зони на передній поверхні інструменту. Поліпшення оброблюваності при використанні попереднього холодного пластичного деформування пояснюється збільшенням густини дислокацій. Їх об'єднання призводить до появи мікротріщин у оброблюваному матеріалі та структурними перетвореннями останнього. Повернення початкових високих експлуатаційних властивостей ви-

робів із аустенітних сталей рекомендується застосуванням прецизійної фінішної термообробки.

Особливість поєднання попереднього холодного пластичного деформування з екологічно чистими мастилами рослинного походження, зокрема з модифікованою рапсовою олією, пояснюється позитивною сумісною дією цих двох технологічних факторів. Для першого з них полегшує процеси у зоні стружкоутворення (на 20–40 % зменшується об'єм зони), а дія другого позитивно впливає на контактні процеси на передній поверхні інструменту шляхом зниження інтенсивності тертя. Так, коефіцієнт тертя зменшується у 1,5–5 рази. Обмеження дослідження поліпшення оброблюваності аустенітних сталей полягають у виборі лише 3-х марок цих сталей легованих хромом, марганцем та нікелем. У той же час існує на порядок більша кількість марок аустенітних сталей.

Метод заглиблення загартованого лінійного індентору із швидкорізальної сталі, який виконується холодним пластичним деформуванням зразків із пластичних матеріалів (сталь, латунь, деформівні алюмінієві сплави тощо). Метод дозволяє отримувати канавки трикутного профілю глибиною 0,005–5 мм з кутами при вершині 30–90°, що служать основою регулярних мікро- та макрорельєфів технологічного і експлуатаційного призначення.

Переваги методу утворення регулярних мікро- та макрорельєфів полягають у їх отриманні методом холодного пластичного деформування, а не різанням лезовим чи абразивним інструментом. Метод передбачає не тільки забезпечення глибини і потрібного профілю, але й зміцнення матеріалу у основі канавки. Разом з тим дослідження вимагає також і вивчення усього діапазону можливих профілів канавок різного призначення.

Як технологічний захід щодо підвищення надійності підшипників кочення запропоноване та досліджене іонно-імпульсне азотування. Метод є фінішною операцією при обробці кілець та кульок підшипників. Роль азотування подвійна: створення захисного поверхневого шару, що не дозволяє проникати у вироби шкідливим речовинам із зовнішнього середовища і підвищення твердості поверхні. Це в кінцевому результаті призводить до поліпшення надійності підшипників кочення.

Разом з тим, іонно-імпульсне азотування є методом, яким отримують вакуумні плівкові покриття різного призначення, що підвищують зносостійкість, теплостійкість, корозійну стійкість, товарний вигляд деталей тощо. Виходячи з цього, потрібно було б продовжити вивчення плівкових покриттів, особливо в частині використання сполук Mo, Ti, Al, Ta, Nb та інших композицій. Перспективним є також вивчення цих покриттів як твердих мастил у парах тертя та захисту виробів від високих температур, наприклад, лопаток газових турбін.

Для ліквідації негативної дії спадковості сусідніх механічних операцій на геометричні характеристики обробленої поверхні рекомендується змінювати напрямок головних рухів операцій на 90°. Результати дослідження, наведеного у статті, можуть стати основою, як мінімум, створення чотирьох технологій виробництва відповідальних деталей машин.

6. Висновки

1. Визначена наступна послідовність операцій по поліпшенню оброблюваності парамагнітних аустенітних сталей: холодне об'ємне пластичне деформування методом поперечного стискання з деформаціями 40–90 % – різання лезовим інструментом – повернення початкових експлуатаційних властивостей деталей прецизійною термообробкою.

2. Розроблено типові методи отримання регулярних мікро- та макрорельєфів технологічного та експлуатаційного призначення протяжним інструментом і редукуванням на фасонних оправках. В основу способу отримання кільцевих канавок для поділу стружки покладено контактне явище, яке супроводжує короточасні зупинки (0,2–0,4 с) і відновлення протягування. При цьому на обробленій поверхні утворюється канавка глибиною 0,02–0,05 мм. Канавку можна збільшити по глибині ультразвуковим або статичним довантаженням до 0,2 мм. Експлуатаційні канавки глибиною до 3 мм отримують методом редукування на фасонних оправках.

3. Вирішена задача розподілу навантаження між тілами кочення у підшипниках кочення варіаційно-експериментальним методом та підвищення експлуатаційних властивостей підшипників шляхом застосування захисних плівкових покриттів. Цими покриттями товщиною 0,002–0,01 мм захищають обойми та тіла кочення підшипників кочення. Захисна роль покриттів полягає у заліковуванні мікротріщин від шліфування та підвищенні твердості, а значить і зносостійкості поверхонь високонавантажених деталей.

4. Визначено технологічний метод зниження хвилястості поверхні глибоких отворів деталей типу гільз зміною напрямків головних рухів на суміжних операціях механічної обробки. Ці операції виконуються формують формуючим деформуюче-різальним протягуванням, що має головний рух уздовж деталі. процес характеризується утворенням системи поздовжніх мікронерівностей і хвилястості обробленої поверхні від системи "верстат – пристрій – інструмент – деталь". Для ліквідації цих погіршень обробленої поверхні рекомендується змінити головний рух на наступні операції розкатки на $\pi/2$ до осі деталі.

Література

1. ДСТУ 2860:1994. Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1995. 26 с.
2. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Ткачук Н. А., Дьяченко С. С., Посвятенко Э. К. и др. Харьков: Планета-Принт, 2018. 259 с.
3. ISO14577–3:2015. Metallic materials. Instrumented indentation test for hardness and materials parameters. Part 3: Calibration of reference blocks. Geneva, ISO Publ, 2015. 8 p.
4. Trent E. M. Metal Cutting. Elsevier, 1984. 254 p. doi: <https://doi.org/10.1016/c2013-0-00966-8>
5. Enahoro H. E. Effekt of cold – working on chip formation in metal cutting // Ann. C.S.R.P. 1966. Issue 13. P. 251–261.

6. Wagner H. D., Lourie O., Zhou X. F. Macrofragmentation and microfragmentation phenomena in composite materials // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999. Vol. 30, Issue 1. P. 59–66. doi: [https://doi.org/10.1016/s1359-835x\(98\)00072-4](https://doi.org/10.1016/s1359-835x(98)00072-4)
7. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology // *Journal of Materials Research*. 2004. Vol. 19, Issue 1. P. 3–20. doi: <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.0002>
8. Інноваційні технології композиційного зміцнення поверхні елементів виробів для оборонної та енергетичної галузей / Марченко А. П., Ткачук М. А., Соболев О. В. та ін. // *Механіка та машинобудування*. 2017. № 1. С. 234–246. URL: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/33143/1/MM_2017_1_Marchenko_Innovatsiini.pdf
9. Азотирование и карбонитрирование: монография / Чаттерджи-Фишер Р., Эйзел Ф. В., Хофман Р. и др.; ред. А. В. Супов. М.: Металлургия, 1990. 280 с.
10. Interdependence between stress and texture in arc evaporated Ti–Al–N thin films / Falub C. V., Karimi A., Ante M., Kalss W. // *Surface and Coatings Technology*. 2007. Vol. 201, Issue 12. P. 5891–5898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.10.046>
11. Stout K. Y., Dong W. P., Mainsah E. A Proposal for Standardisation of Assessment of Three-Dimensional Mikro-Topography-Part 1: Surface Digitisation and Parametric Characterisation. Birmingham: The University of Birmingham, 1993. 21 p.
12. Chen X., Chen G. On the thermally induced cracking of a segmented coating deposited on the outer surface of a hollow cylinder // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, Issue 9. P. 1114–1120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.10.002>